



回帰学習による動きの対応付けを用いたアバタ操作手法 「なりきり制御」の提案

山口周¹⁾, 畑田裕二¹⁾, 鳴海拓志¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {yamaama, hatada, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 本研究では、重機や動物等の非ヒト型アバタを直観的に操作するための手法として、「なりきり制御」を提案する。なりきり制御では、ユーザが非ヒト型アバタの動作を見てそれを自分なりに真似た時の身体動作を記録し、これと非ヒト型アバタの関節角度とを回帰学習で対応付けることで、ユーザの動きを非ヒト型アバタの動きに変換する。この手法により自由度の異なる3つの非ヒト型アバタを操作させる実験の結果、関節自由度が小さいアバタを操作する際には行為主体感と自己効力感が高まり、直観的な操作が可能であることが示唆された。

キーワード: ユーザインタフェース, なりきり制御, アバタ, 運動変換, 回帰学習

1. はじめに

大型重機等の機械をヒトが操作するには、機械の関節1つ1つに対応したレバーやペダルなどの入力装置が用いられることが多い。この操作手法では、関節の数が増加するにつれて操作が煩雑になり、直観的でなくなるという問題がある。こうした非ヒト型操作対象(非ヒト型アバタ)は、使いこなすのに長時間の訓練が必要であったり、訓練不足による事故が発生したりする。

多数の関節を持つロボットやアバタの操作手法は、大きく分けて順運動学と逆運動学とがある。順運動学とは、ロボットやアバタの各関節に目標角度を与えることでエンドエフェクタの位置と姿勢を決定する操作手法である。また、逆運動学とは、まずエンドエフェクタの目標とする位置と姿勢を定め、それを実現するような関節角度を各関節に与えることで全身の姿勢を決定する操作手法である。ヒトの身体構造とは異なる四足歩行動物や重機等の非ヒト型アバタの姿勢を決定するには、数値で決定されるアバタの姿勢を想像し、それを見越して数値を決定しなければならない。これは、論理的思考を行ったり結果を想像したりする必要がないという直観の定義に反する。直観とは、無意識的で、迅速(論理的な思考を介さない)、かつ包括的な連想によって生じる感情的な判断であると定義される[1]。無意識的な情報処理を行う時には、行動に対する結果が想像されることがないという特徴がある。したがって、順運動学でも逆運動学でも、単にこれを用いる限りでは、非ヒト型アバタの直観的な操作は難しいと考えられる。

これに対し、ヒトの身体構造を模したヒト型ロボットや、バーチャルリアリティ(VR)におけるヒト型アバタは、このような煩雑さや直観性の問題を解決している。しかし、ヒト型ロボットやヒト型アバタが行える作業はヒトが行う作業の範疇を越えず、それぞれの作業に特化した機械や、別の身体知を持つ動物と比べると、行える作業には限界がある。

このように、身体構造が異なる事による直観性と作業の多様性の変化にはトレードオフの関係があると言える。ここまですべてを図1上部にまとめる。

本稿では、ヒト以外の身体構造を持つアバタの動きと、それを操作する操作者の身体の動きを対応付けることで、ヒト型アバタを操作する直観性を保ったままヒト以外の身体構造を持つ対象を操作する手法を提案する。本研究の目標を図1下部に示す。

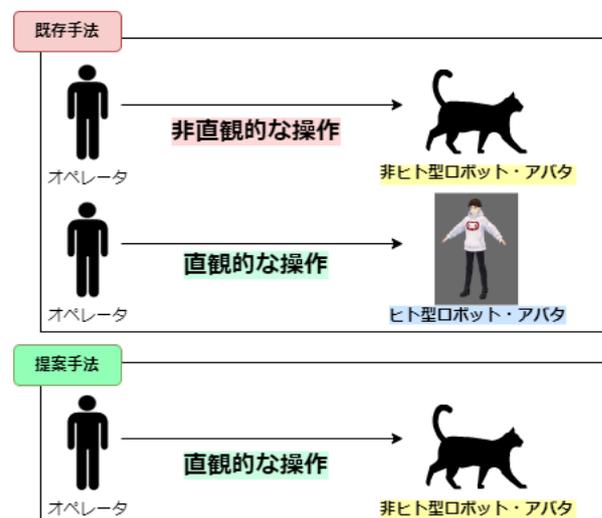


図1: ロボット・アバタを動かす際の既存の操作手法と提案手法の比較。

2. 関連研究

これまでにも、非ヒト型アバタを身体の動きを用いて操作した実例[2, 3, 4]は多い。これらの多くは、アバタの見た目の印象によってパイロットの認知や行動が影響を受けるとするプロテウス効果[5]の効用を検証するための研究であり、非ヒト型アバタの操作手法そのものには焦点を当て

ていない。そのため、これらの例では、ヒトの身体構造に自然に変換可能な動物（鳥 [3] やドラゴン [2]）がモデルのアバタが用いられていたり、実験者による恣意的な動きの対応付けが行われた結果直観性が損なわれたりしており、非ヒト型アバタの直観的な操作が行われていたとは必ずしも言えない。

多自由度を持つ操作対象の直観的な操作を試みた研究例として、「つもり制御 [6]」が知られている。つもり制御では、それぞれ 6 自由度の入力自由度を持つ 2 本の操縦桿を通じたパイロットの入力と、多自由度ロボットの動きをパッケージ化した行動分節とを事前の分類学習によって対応付けることで、パイロットが意図した動作を実際にロボットが行う。つもり制御は少ない自由度の入力でロボットの半自動制御ができる可能性を示したという点で画期的である。しかし、事前に想定された動作しか行えないことや、ロボットが行う動作をあらかじめ実装しておかなければならないことなど、実用化する上で課題も多い。

3. 提案手法

提案システムでは、パイロットの身体動作を説明変数、非ヒト型アバタの各関節角度を目的変数とした回帰学習を行うことで、操作対象の直観的な操作の実現を目指す。システムは、回帰学習を境に学習フェーズと実働フェーズに分かれる。学習フェーズでは、非ヒト型アバタが動いている様子をパイロットが観察・解釈し、パイロットはそれに合わせて身体を動かす。この時に表示されるアバタを手本アバタと呼称する。パイロットの身体動作は Vive Pro ヘッドマウントディスプレイ (HMD)¹およびその周辺機器であるコントローラとトラックパッド²を用いて計測し、頭部、両手、両足それぞれの位置、姿勢、速度、角速度の合計 60 自由度を入力として使用する。なお、手本アバタの動作は、その操作対象が自然に行うと考えられる動作を著者が作成したものを使用する。

次に、両者の身体の動きを記録して回帰学習を行い、学習器を構築する。一般に、ヒトと非ヒト型アバタの動きの対応がどのような曲線で表現されるかは明らかでない。したがって、本研究では暫定的に両者の動きに線形関係があると仮定し、重回帰分析を学習モデルとして利用する。

その後、実働フェーズではパイロットの身体の動きの情報在学习器を介して非ヒト型アバタの関節角度にリアルタイムに変換される。この時のアバタを操作アバタと呼称する。

このように、機械学習などを媒介として、パイロットが非ヒト型アバタになりきって身体を動かすことでアバタの操作を行う手法を、本稿では「なりきり制御」と呼称する。なりきり制御の概要を図 2 に示す。

提案システムは、学習器の出力を操作対象の行動分節ではなくリアルタイムの関節角度としたために、つもり制御と比べてパイロットが思い描く任意の姿勢を取らせやすく、

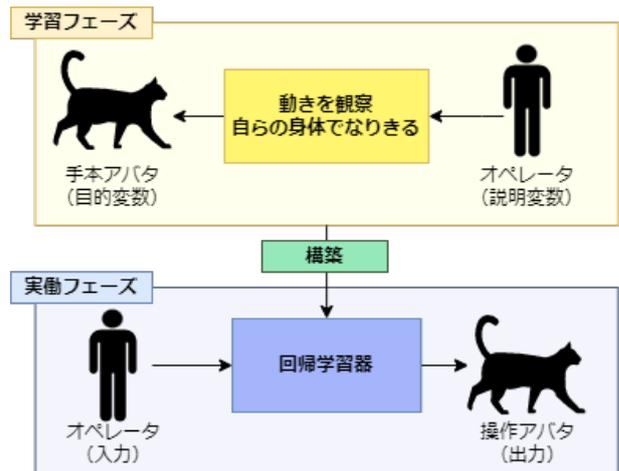


図 2: パイロットが非ヒト型アバタになりきって身体を動かすことでアバタの操作を行う「なりきり制御」の概要図。



図 3: 条件ごとの非ヒト型アバタの外観。左から順に Stick 条件, Excavator 条件, Cat 条件で用いるアバタ。

汎化性能が高いという利点が考えられる。一方、提案手法の対応させるべき入出力の関係の種類がつもり制御のそれよりも大きく増加したと捉えることができ、学習を行う際の手間が増加するという欠点も予想される。

4. 実験

提案システムがパイロットの意図をどれだけ再現できるかを評価するため、アバタの異なる 3 条件について、参加者内実験を行った。

前章までの背景を踏まえ、操作するアバタを重機および動物の中から採用した。重機からは、比較的関節数が多く、エンドエフェクタを換装することで多様な作業を行うことができる油圧ショベル（4 自由度）を採用した。動物からは、ヒトの身体構造では再現が難しい尾を持つ猫（114 自由度）を採用した。また、なりきり制御を用いる時の最も基本的な操作対象として扱うことができる可能性を考え、棒（3 自由度）も操作するアバタに採用した。棒には向きが特定できるように、T 字状の突起を取り付けた。これらのアバタを使用する実験条件をそれぞれ Stick 条件, Excavator 条件, Cat 条件とした。

実験には 12 名（男性のみ、平均年齢 22.17±1.20 歳）が参加した。参加者は HMD を装着し、VR 空間上に表示された T 字の棒、油圧ショベル、猫の 3 つの手本アバタが動く様子を観察・解釈し、手本アバタになりきって身体を動か

¹<https://www.vive.com/jp/product/vive-pro-full-kit/>

²<https://www.vive.com/jp/accessory/vive-tracker/>



図 4: 実験の様子。実験参加者は学習器の構築後に行われる 2 回目のなりきりタスクを行っている。その動きを元にして、油圧ショベルアバタが動いている。この時の油圧ショベルアバタの様子は実験参加者の HMD には表示されず、実験者のみが確認できる。

すタスク（なりきりタスク）を行った。実験参加者の視点は手本アバタの背後に 3 人称視点で配置した。その後、実験参加者の身体と手本アバタの動きを用いて重回帰分析を行い、学習器を構築した。学習は 2, 3 分程度を要した。この時、実験参加者はその場で待機した。学習後、提示する手本アバタの動きに変更を加えた上で、実験参加者は 2 回目のなりきりタスクを行った。なりきりタスク中、実験参加者の HMD には手本アバタのみが表示されるが、実験者は実験参加者の身体の動きに応じて動く操作アバタを確認できる。その様子を図 4 に示す。この時、実験参加者の身体と非ヒト型アバタの動きの双方が記録された。最後に、実験参加者は自身の動きに応じて動く操作アバタを見ることが出来る状態で、これまでに提示してきた手本アバタの動きを真似するタスク（ものまねタスク）を行った。操作アバタは手本アバタと重なる位置に配置した。この時、手本アバタを半透明に表示することで、実験参加者が両者を見分けることができるようにした。

つもり制御では、パイロットの行動意図と実際にロボットが行った行動との一致率を評価指標として使用していたが、なりきり制御は回帰学習によって動きの対応付けを行うため、この評価指標を使用するのは現実的でない。そこで本稿では、パイロットが非ヒト型アバタを操作する際の行為主体感と自己効力感をアンケートで測定し、評価指標とした。実験参加者の行為主体感とは、Sense of Embodiment の度合いを評価する VEQ[7] 質問票中の行為主体感を評価する項目で測定した。また、ものまねタスクについて実験参加者に説明した後、手本アバタの動きを何%再現できるかを口頭で申告させることで、自己効力感を評価した。

5. 結果と考察

アンケート調査の結果、最後のものまねタスク中の行為主体感と自己効力感の値は図 5 の左右のようになった。

行為主体感について、Stick 条件 ($M = 5.06, SD = 1.79$), Excavator 条件 ($M = 4.63, SD = 1.36$), Cat 条件 ($M =$

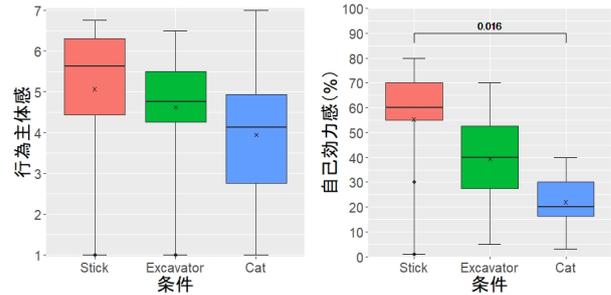


図 5: アバタの種類ごとの行為主体感と自己効力感。

3.94, $SD = 1.73$) に対してフリードマン検定を行ったところ、主効果が有意であった ($\chi^2 = 7.24, p = 0.027$)。そこで条件についてウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ、Stick 条件と Excavator 条件 ($Z = 0.98, p > .05, r = 0.163$), Excavator 条件と Cat 条件 ($Z = 1.41, p > .05, r = 0.236$), Cat 条件と Stick 条件 ($Z = 1.23, p > .05, r = 0.207$) のいずれにおいても有意差は見られなかった。多重比較の補正にはホルム法を用いた。

また、自己効力感について Stick 条件 ($M = 55.25, SD = 21.9$), Excavator 条件 ($M = 39.17, SD = 21.0$), Cat 条件 ($M = 21.9, SD = 12.8$) に対してフリードマン検定を行ったところ、主効果が有意であった ($\chi^2 = 9.9, p = 0.0070$)。そこで条件についてウィルコクソンの符号順位検定を行ったところ、Excavator 条件と Cat 条件 ($Z = 1.97, p < .05, r = 0.328$) および Cat 条件と Stick 条件 ($Z = 2.41, p < .02, r = 0.402$) で有意差が見られた。一方、Stick 条件と Excavator 条件 ($Z = 1.54, p > .05, r = 0.257$) では有意差は見られなかった。多重比較の補正にはホルム法を用いた。

以上のように、行為主体感と自己効力感はアバタの複雑さに応じていずれも低下した。その原因として、現段階での手法でシステムの入力自由度と出力自由度の差を十分に補完することができなかったために、取れる姿勢が限定されたり、意図しない部位が動いてしまったりして直観性が損なわれたことが考えられる。出力自由度と入力自由度の差が一定以上になると、非ヒト型アバタの操作が困難になる可能性は、既に提案手法で触れた通りである。したがって、出力自由度に釣り合うように入力自由度を増加させたり、少ない自由度の入力でも十分な直観性を担保できるような高性能の学習方法を模索したりすることで、操作の直観性を向上できる可能性がある。

5.1 入力自由度を増加させた際のシステムの性能に関する検証

入力自由度を増やす検証として、モーションキャプチャスーツ Xsens³によるフルボディトラッキングを使って入力自由度を 60 から 300 に増加させた追加実験を 1 名の参加者に対して行ったところ、数値的にも口語的にも行為主体感と自己効力感とは本実験の結果と同様の傾向であった。これは、入力自由度を増加させすぎたことによって学習に必

³<https://www.xsens.com/>

要なデータの量が膨大になる次元の呪いによって、十分な学習が行われなかったことが原因であると考えられる。したがって、複雑なアバタを操作する際はアバタを逆運動学で操作するなど、出力自由度を何らかの方法で下げることが必要だと考えられる。

5.2 学習モデルを変更した際のシステムの性能に関する検証

操作アバタの動きを観察すると、手本アバタの動きと比べて過不足のある動きが見られた。例えば、Excavator 条件における油圧ショベルアバタの先端の関節が実験参加者の身体の動きに対して回転しにくかったり、Cat 条件における猫アバタの両前脚の付け根関節が、外側に広げる方向に過剰に回転し、時に 360° 以上回転したりしたことが挙げられる。また、実験参加者が直立した際、アバタが初期姿勢にならない状態が観察された。これは、学習器の入出力に線形性を仮定して重回帰分析を採用したことが原因ではないかと考えられる。この問題は直観性の観点から見ても重要である。実験時のインタビューにおいて、12名中5名の参加者が「(なりきりタスク中に)自分で操作しているアバタの動きが自分の意図と反していたために、新たな対応関係を模索しなければならなかった」と回答した。これは自らの身体の動きと対応した操作対象の動きを意識して操作を行っている状態を表しており、無意識で迅速に起こる直観によって対象を操作しているとは言い難い。重回帰分析より広範な範囲に対して最適化が可能な学習モデルを採用することで操作の直観性を向上できる可能性がある。

重回帰分析の代わりに3層パーセプトロンを用いて学習器を構築し、これを介して出力される非ヒト型アバタの動きの様子を観察した。すると、T字の棒と油圧ショベルの動きは提示アバタの動きに近づいた。このことから、より複雑な学習モデルを採用する意義はあると考えられる。一方で、猫の動きは重回帰分析の場合よりも安定せず、提示アバタとの関連が見られない動きが増加した。原因として、学習器の収束に膨大な量のデータが必要になったことで、十分な学習が行われなかった可能性が考えられる。入力自由度を増やした検証の結果も踏まえると、操作する非ヒト型アバタへの出力自由度を減少させることがなりきり制御にとって肝要であると考えられる。

また、実験参加者の身体情報を取得する各入力装置の各回転軸(x軸, y軸, z軸)のシステム上の角度が 0° になる前後で、アバタの関節の角度が不連続に変化することが観察された。これは、入力装置の角度が 0° の時と 360° の時とで出力が等しくなるような拘束をかけていなかったことが原因であると考えられる。実験時のインタビューにおいて、これによって操作がしづらくなったと回答した実験参加者がいたため、今後改良する必要がある。

6. おわりに

本研究では、実身体と同期したヒト型アバタを動かすような直感性を保ったまま非ヒト型アバタを動かす「なりき

り制御」の提案・開発を行った。実験を通して、T字の棒や油圧ショベル等の自由度が低い操作対象は比較的単純な構造の学習モデルでも十分操作可能である可能性が示唆された。一方で、四足歩行動物等の複雑な構造のアバタの操作は困難であった。ただし、学習モデルの吟味をはじめとする複数の項目について工夫する余地があり、将来的に操作できるようになる可能性がある。

謝辞 本研究の一部は、JST ムーンショット型研究開発事業(JPMJMS2013)および科研費 挑戦的研究(萌芽)(20K21801)の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Erik Dane and Michael G Pratt. Exploring intuition and its role in managerial decision making. *Academy of management review*, Vol. 32, No. 1, pp. 33–54, 2007.
- [2] Akimi Oyanagi, Takuji Narumi, Jean-Luc. Lugin, Hideyuki Ando, and Ren Ohmura. Reducing the fear of height by inducing the proteus effect of a dragon avatar. *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol. 25, No. 1, pp. 2–11, 2020.
- [3] Andrey Krekhov, Sebastian Cmentowski, Katharina Emmerich, and Jens Krüger. Beyond human: Animals as an escape from stereotype avatars in virtual reality games. In *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, CHI PLAY '19, p. 439–451, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [4] Sun Joo (Grace) Ahn, Joshua Bostick, Elise Ogle, Kristine L. Nowak, Kara T. McGillicuddy, and Jeremy N. Bailenson. Experiencing Nature: Embodying Animals in Immersive Virtual Environments Increases Inclusion of Nature in Self and Involvement with Nature. *Journal of Computer-Mediated Communication*, Vol. 21, No. 6, pp. 399–419, 2016.
- [5] Nick Yee and Jeremy Bailenson. The Proteus Effect: The Effect of Transformed Self-Representation on Behavior. *Human Communication Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 271–290, 2007.
- [6] 丹羽真隆, 飯塚博幸, 安藤英由樹, 前田太郎. つもり制御: 人間の行動意図の検出と伝送によるロボット操縦 ([特集] テレイングジスタンスのためのロボティクス・グラフィクス・インタフェース). *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 17, No. 1, pp. 3–10, 2012.
- [7] Daniel Roth and Marc Erich Latoschik. Construction of the virtual embodiment questionnaire (veq). *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 26, No. 12, pp. 3546–3556, 2020.